

LIBS technique application in the water study at the "El Limon trail" in Palmar de Varela, Atlántico

Aplicación de la técnica LIBS en estudio del agua en el sendero "El Limón" del municipio de Palmar de Varela -Atlántico

L. Corado^{1,2*}, J. Álvarez², P. Pacheco², A. Ghisays²

¹Estudiante programa de Maestría en Ciencias Física, Universidad del Atlántico

²Profesor programas de Física, Universidad del Atlántico

(*) E-mail: paolapacheco@mail.uniatlantico.edu.co

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 13/12/2021

Accepted: 02/02/2022

DOI: 10.7149/OPA.55.1.51096

ABSTRACT:

In this work, the application of Laser Induced Plasma Spectroscopy (LIBS) is presented as a complementary method for the study and characterization of an underground water sample from the "El Limón" trail in the municipality of Palmar de Varela - Atlántico in Colombia. To carry out the study, the Geophysical electrical prospecting technique was first used, in order to identify underground aquifers in the study area, later the water samples were extracted and then analyzed using the LIBS technique. For the generation of the plasma-laser, a pulsed Nd: Yag laser was used with a length of 532 nm and a duration of ~ 5ns, the laser radiation on the sample was focused using a converging lens of 12 cm focal length, the energy per pulse was approximately 60 mJ, the relative humidity of the environment was 55% with a temperature of 24 ° C. The spectra of the laser plasma on the sample were recorded with an Echelle type spectrograph coupled to an ICCD camera within the spectral region of 200-950 nm. The spectral assignment of the lines found in the spectra of the sample was carried out, compared with the spectra taken from spectral sources known as: plasma-laser in Air and the NIST database, identifying the elements present Ca, N, Cl, O, F, and Na.

Key words: Plasma-Laser, Spectral Analysis, Electrical Prospecting.

RESUMEN:

En este trabajo se presenta la aplicación de Espectroscopia de Plasma Inducido por Láser (LIBS) como método complementario para el estudio y caracterización una muestra de agua subterránea del sendero "El Limón" del municipio de Palmar de Varela – Atlántico en Colombia. Para llevar a cabo el estudio primeramente se utilizó la técnica Geofísica de prospección eléctrica, con la finalidad de identificar acuíferos subterráneos en la zona de estudio, posteriormente se extrajeron las muestras de agua para luego analizar utilizando la técnica LIBS. Para la generación del plasma-láser se utilizó un láser pulsado de Nd:Yag con una longitud de 532 nm y una duración de ~5ns, la radiación del láser sobre la muestra se enfocó utilizando una lente convergente de 12 cm de distancia focal, la energía por pulso fue de aproximadamente 60 mJ, la humedad relativa del ambiente fue de 55% con una temperatura de 24°C. Los espectros del plasma laser sobre la muestra fueron registrados con un espectrógrafo tipo Echelle acoplado a una cámara ICCD dentro de la región espectral de 200-950 nm. Se realizó la asignación espectral de las líneas encontradas en los espectros de la muestra, comparado con los espectros tomados de fuentes espectrales conocidas como: plasma-laser en Aire y la base de datos del NIST, identificando los elementos presentes Ca, N, Cl, O, F, y Na.

Palabras clave: Plasma-Laser, Análisis espectral, Prospección eléctrica.



REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] Singh, J. P., & Thakur, S. (Eds.). (2007). *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Elsevier.
- [2] Miziolek, A. W., Palleschi, V., & Schechter, I. (Eds.). (2006). *Laser induced breakdown spectroscopy*. Cambridge, University Press.
- [3] Zhang, D. C., Hu, Z. Q., Su, Y. B., Hai, B., Zhu, X. L., Zhu, J. F., & Ma, X. "Simple method for liquid analysis by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)," *Optics Express*, vol. 26, no. 14, p. 18794, Jul. 2018, doi: 10.1364/oe.26.018794.
- [4] V. Lazic, F. Colao, R. Fantoni, and V. Spizzicchino, "Laser-induced breakdown spectroscopy in water: Improvement of the detection threshold by signal processing," in *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*, Aug. 2005, vol. 60, no. 7-8, pp. 1002-1013. doi: 10.1016/j.sab.2005.06.007.
- [5] Tawfik, W., Bousiakou, L. G., Qindeel, R., Farooq, W. A., Alonizan, N. H., & Fatani, A. J. (2015). Trace analysis of heavy metals in groundwater samples using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). *The Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 9, 185-192.
- [6] X. Yu, Y. Li, X. Gu, J. Bao, H. Yang, and L. Sun, "Laser-induced breakdown spectroscopy application in environmental monitoring of water quality: a review," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 186, no. 12, pp. 8969-8980, Sep. 2014, doi: 10.1007/s10661-014-4058-1.
- [7] Auge, M. (2006). *Agua subterránea, deterioro de calidad y reserva*. Universidad de Buenos Aires.
- [8] Mogollón, J. P., Rivas, W., Rivas, J. G., & Martínez, A. (2017). Procesos de degradación de suelos asociados a la desertificación en la península de Paraguaná, Venezuela.
- [9] Paris, M., Gutiérrez, J., & Marín, J. (2018). Calidad de agua subterránea en el sector centro occidental del municipio Miranda (estado Zulia, Venezuela). *Aqua-LAC*, 10(2), 38-45. vol. 10, no. 2, 2018, doi: 10.29104/phi-2018-aqualac-v10-n2/04.
- [10] Lowrie, W., & Fichtner, A. (2020). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press.
- [11] A. Philips Aizebeokhai, "2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design," *Scientific Research and Essays*, vol. 5, no. 23, pp. 3592-3605, 2010, [Online]. Available: <https://academicjournals.org/journal/SRE/article-abstract/FCF7A6116235>
- [12] Layugan, D. B. (1981). Geoelectrical sounding and its application in the Theistareykir high-temperature area, NE-Iceland. *Orkustofnun*.
- [13] P. Pacheco, F. Racedo, R. Sarmiento, E. Mejia, and R. Cabanzo, Caracterización de Espectros de Aire, Ar y Mezcla Aire-Argón Mediante la Técnica de Espectroscopía de Plasma Producido por Laser, LPPS. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 2009, vol. 7, no 2, p. 1-6.
- [14] NIST Atomic data base Lines Form, http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

1. Introducción

La técnica de Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS), es una técnica de Espectroscopía de Emisión Atómica (EEA), la cual se basa en la generación y análisis espectral de un plasma producido al enfocar la radiación de un pulso láser sobre una muestra [1], [2]. Este análisis proporciona información sobre la composición de la muestra, la cual puede ser un sólido, un líquido o un gas [3]. Autores como Lazic et al. [4] y Tawfik et al [5] muestran que la técnica LIBS puede ser aplicada en muestras de agua, con el fin de detectar los elementos que la conforman para hacer control de la calidad del agua,, realizando poco o ningún tipo de preparación [6].

En este trabajo de investigación se utilizó la técnica LIBS, como complemento de estudio hidrogeológico realizado en el sendero el Limón del municipio de Palmar de Varela - Atlántico en Colombia, con el fin de caracterizar el agua encontrada a través de estudios geoelectricos, determinando de manera cualitativa los elementos presentes en el recurso hídrico.

El sendero "El Limón" se encuentra en jurisdicción rural del municipio de Palmar de Varela, el cual a su vez se ubica en la zona oriental del departamento del Atlántico colombiano. La principal actividad que se desarrolla en la zona es de carácter agrícola, sin embargo, los agricultores de este sector no cuentan con fuentes de agua potable ni de aguas superficiales a sus alrededores, lo que los lleva a transportar el agua desde el casco urbano hasta sus extensiones de tierra, otros han optado por utilizar captaciones artesanales de aguas subterráneas, las cuales no entregan el caudal requerido y no han sido elaboradas con técnicas

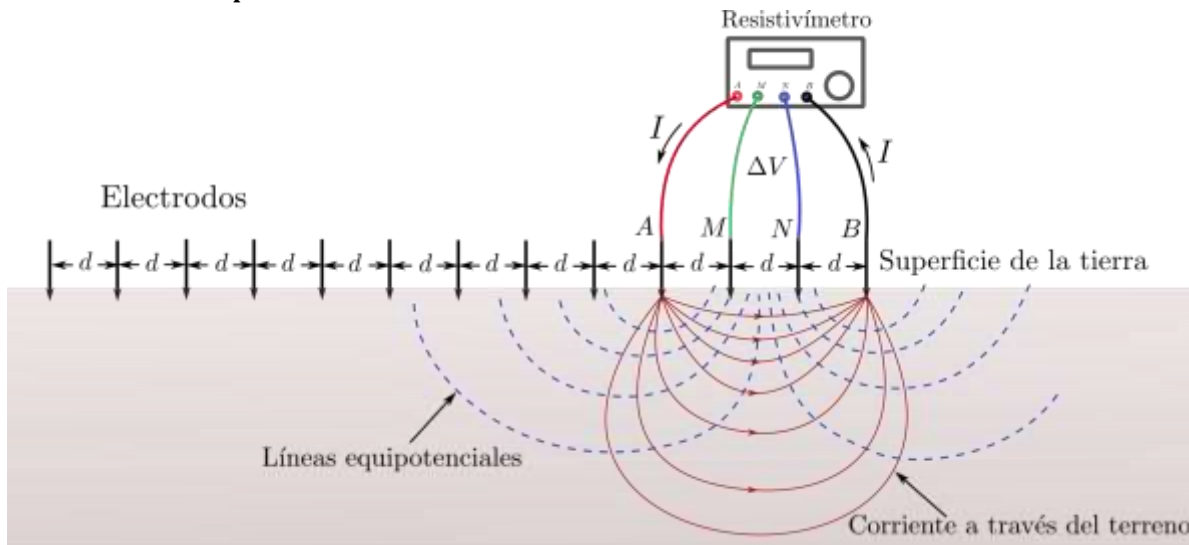


adecuadas, de tal modo que estas no permiten saber si el agua extraída proviene de un acuífero o de corrientes subterráneas, las cuales pueden alterar las propiedades químicas, físicas y/o biológicas del agua [7] generando un recurso hídrico de mala calidad. Como es bien sabido, aplicar agua de mala calidad sobre el terreno puede generar múltiples consecuencias como deterioro del suelo y desertificación del terreno [8],[9].

2. Referente teórico

En la ejecución de este trabajo fue necesario la implementación de dos técnicas analíticas, la primera técnica utilizada fue la prospección geoelectrica esta se usó con el fin de realizar estudio hidrogeológico en la zona de interés y la segunda fue la Espectroscopía de plasma inducida por láser LIBS por sus siglas en inglés, esta se usó para caracterizar la muestra de agua extraída de la zona, con el fin de identificar los elementos presentes en el agua subterránea y valorar de esta forma la viabilidad y los posibles usos de esta agua.

2.a. Método de Prospección Geoelectrica



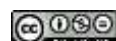
Fíg.1. Esquema básico para aplicación de la técnica de prospección Geoelectrica. Se utiliza un resistivímetro que inyecta corriente en el terreno a través de unos electrodos que se encuentran separados una distancia d y luego sensa el voltaje inducido.

En esta técnica se hace uso de la corriente eléctrica para investigar la distribución de resistividades del suelo a través del sondeo eléctrico vertical (SEV). Para el estudio de las resistividades en suelo pueden usarse diferentes configuraciones, entre las más utilizadas tenemos las que usan cuatro electrodos tales como la configuración Wenner y la Schlumberger [10], [11]. Cada una con diferentes ventajas y desventajas frente a la otra. Para el estudio realizado en este trabajo nosotros usamos la configuración Wenner, en esta configuración los electrodos permanecen equidistantes uno del otro. Las medidas se realizaron con un resistivímetro PASI modelo 16GL-N que viene equipado para la conexión de los cuatro electrodos, los electrodos más externos son llamados *electrodos de corriente* marcados con las letras A y B en la figura 1 y los electrodos más internos llamados *electrodos de voltaje* marcados con las letras MN.

Para poder entender cómo se llevan a cabo este tipo de estudios, debemos considerar el subsuelo como un medio isotrópico y homogéneo a través del cual fluye una corriente I . Para este tipo de medios, la densidad de corriente \vec{J} se relaciona con el campo eléctrico \vec{E} a través de la ley de Ohm [11].

$$\vec{E} = \rho \vec{J} \quad (1)$$

donde la constante de proporcionalidad ρ es la resistividad eléctrica del medio. Esta propiedad expresa la capacidad que tiene el medio de oponerse al flujo de las cargas.



Por ser conservativo el campo eléctrico, este se puede expresar como menos el gradiente de un potencial ($E = -\nabla V$), con lo cual, la expresión (1) cambia a

$$-\frac{dV}{dr} = \rho \frac{I}{A} \quad (2)$$

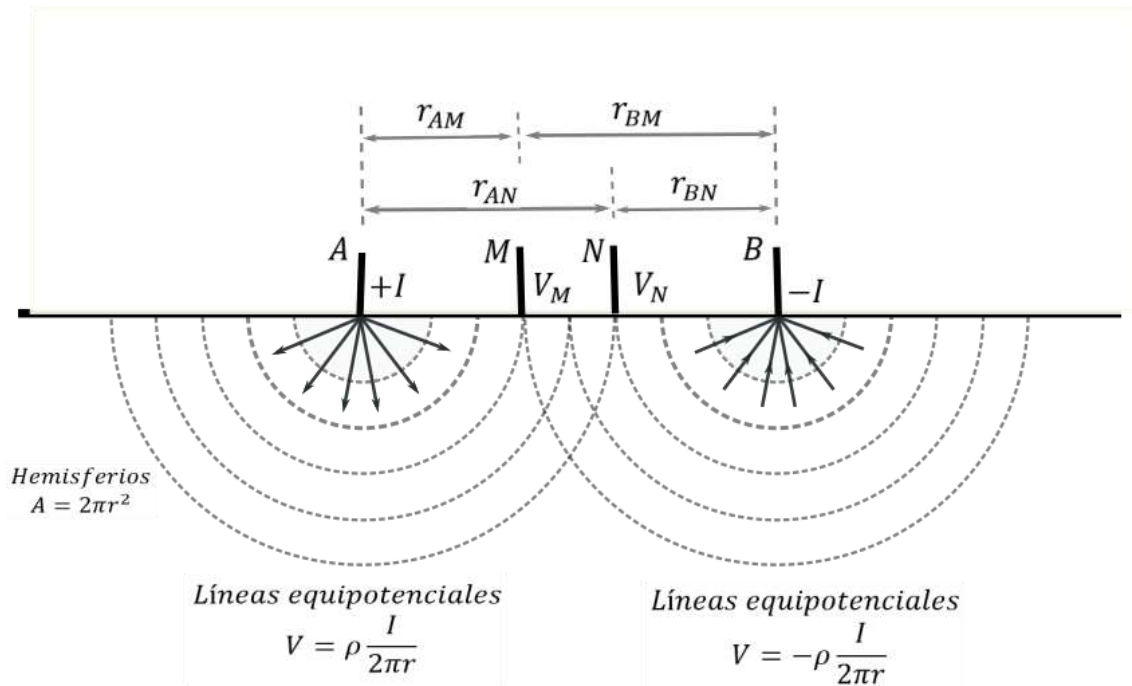


Fig.2. Esquema implementado para calcular el potencial eléctrico a una distancia r de los electrodos de corriente en la técnica de prospección eléctrica.

El punto de contacto de los electrodos AB actúan como una fuente de corriente, desde la cual la corriente se dispersa hacia afuera. Las superficies equipotenciales, por las cuales atraviesan la corriente, tienen forma hemisférica de área superficial $2\pi r^2$. De esta forma la ecuación (2) se convierte en:

$$V = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (3)$$

En la práctica se utilizan dos electrodos de corriente, uno como fuente y otro como sumidero. El potencial alrededor de una fuente de corriente es positivo, mientras es negativo en un sumidero, donde la corriente fluye del suelo hacia el electrodo. Con estas observaciones podemos calcular el potencial en un punto arbitrario entre el par de electrodos a distancias conocidas de la fuente y el sumidero. El potencial en un electrodo de detección M debido a una fuente A es $+\rho I / (2\pi r_{AM})$, mientras que el potencial en ese mismo electrodo debido a un sumidero B es $-\rho I / (2\pi r_{MB})$. El potencial combinado en M es

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) \quad (4)$$

De forma análoga, se puede calcular el potencial en otro electrodo ubicado en un punto N , y con este calcular la diferencia de potencial que mediría un voltímetro conectado entre M y N con la ecuación:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \right\} \quad (5)$$

Todas las cantidades en esta ecuación se pueden medir en la superficie del suelo, excepto la resistividad, que viene dada por:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (6)$$



donde K es llamado coeficiente geométrico ($K = 2\pi \left\{ \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{MB}} \right) - \left(\frac{1}{r_{AN}} - \frac{1}{r_{NB}} \right) \right\}^{-1}$) y depende exclusivamente de la separación entre los electrodos. Esta expresión se simplifica aún más cuando la distancia entre los electrodos es equidistante. El procedimiento se repite con todos los electrodos al ir corriendo todo el sistema y una vez que se llega al final se van separando más la distancia entre ellos hasta terminar con todos los electrodos. Luego con ayuda de un programa tal como RES2DINV se obtiene un perfil con los valores de la resistividad del terreno, en un plano de dos dimensiones, identificando las zonas de muy baja resistividad es posible encontrar cuerpos de agua subterráneos.

2.b. Espectroscopia De Plasma Inducida Por Láser (LIBS)

La otra técnica implementada en el desarrollo de este trabajo de investigación es la técnica de espectroscopía de plasma inducida por láser (LIBS), el cual es un método de espectroscopía de emisión atómica (EEA). Uno de los propósitos fundamentales de la EEA es determinar la composición elemental de una muestra que puede estar en estado, sólido, líquido o gaseoso. El análisis puede extenderse desde una simple identificación elemental de los componentes atómicos de la muestra hasta una determinación más detallada de concentraciones de masas relativas y absolutas, lo cual requeriría curvas de calibración con muestras patrón. Los pasos básicos en EEA son la vaporización de la muestra para producir especies atómicas libres, la excitación de los átomos y la detección de la radiación emitida por la muestra, y calibración en intensidad para aplicaciones donde se requiera determinación cuantitativa. En la técnica LIBS la atomización y vaporización, lo mismo que la excitación de los átomos para formar el plasma, se realizan en un sólo paso con el uso de un láser pulsado de corta duración. La radiación emitida por los átomos se recoge con ayuda de una fibra óptica y se lleva a un elemento dispersivo que puede ser un espectrógrafo o monocromador el cual separa la radiación en sus diferentes longitudes de onda dando origen a los espectros ópticos típicos en esta técnica.

La figura 3 muestra el montaje experimental utilizado para la implementación de la técnica LIBS en este estudio. Para la formación de los plasmas se utilizó un laser de Nd:Yag pulsado referencia Tempest 10 trabajando en su segundo armónico con una longitud de onda de 532 nm y una energía por pulso máxima de 100 mJ, un atenuador óptico (ATO) permitía variar la energía por pulso entregada a la muestra, para la toma de los datos esta se fijó en 60 mJ, el enfoque del haz sobre la muestra de agua se realizó con una lente convergente (LF) de 12 cm de distancia focal. Debido a la naturaleza líquida del agua no se hizo necesario colocar la muestra en un sistema de rotación automático para cambiar el área de impacto. Se utilizó un colimador de radiación basado en un espejo convergente acoplado a una fibra óptica QP400-2-UV/VIS de dos metros de longitud y 400 μm de diámetro para conducir la radiación del plasma a hacia la rendija de entrada de un espectrógrafo Mechelle 5000 de Andor Thecnology, el cual lleva acoplado una cámara ICCD Andor iStar DH334T y cuenta con un generador de retardos interno que permite realizar la sincronización del láser con la cámara para la captura temporal de los espectros. La señal de disparo de sincronización es tomada de la fuente del láser en la salida Q-switch ubicada en la parte posterior de la fuente.

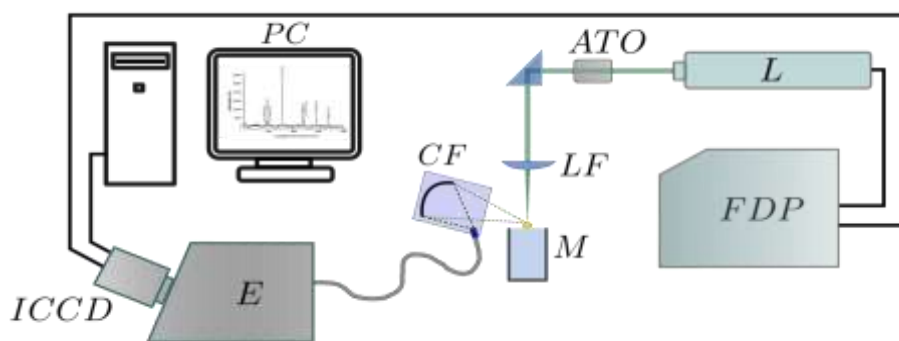


Fig.3. Esquema para montaje experimental para aplicación de la técnica LIBS. Láser (L) de Nd:Yag de 532 nm, Fuente de poder (FDP), atenuador óptico (ATO), Lente de enfoque (LF) de 12 cm de distancia focal, colimador de fibra (CF), muestra de agua (M), computador (PC), Espectrógrafo Mechelle 5000 (E), cámara (ICCD) Andor iStar DH334T. La señal temporización de inicio de captura de los espectros se tomó del pulso Q-switch la fuente de alimentación del láser

3. METODOLOGÍA

El desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo las siguientes actividades: Primero se realizó un reconocimiento de la zona de estudio mediante inspección física de la misma, en esta visita se tomaron datos como las coordenadas de la zona, variables hídricas (épocas y frecuencia de lluvia, aguas superficiales) y variables hidrogeológicas (Captaciones de agua subterránea y uso de la misma). Después de esto se realizaron los perfiles geoelectricos usando la técnica de prospección eléctrica, para ello se utilizó un medidor de resistividad de tierra marca PASI modelo 16GL-N, el cual realiza lecturas simultáneas de corriente y voltaje de alta sensibilidad. Durante la toma de datos se manejaron separaciones secuenciales entre los electrodos de 5 m, 10 m, 20 m, 40 m y 80 m barriendo una longitud total de 360 m en línea recta. Una vez tomados los datos de resistividad eléctrica se procesaron a través del software de inversión geofísica RES2DINV versión 4.8.10, para obtener la tomografía del subsuelo, con la cual se pudo detectar la ubicación de acuíferos y analizar sus características. Una vez identificado la posible ubicación de acuíferos se realizó una perforación profunda en la zona escogida, el agujero del pozo se revistió con tubo PVC pesado de 4 pulgadas de diámetro, de esta perforación se extrajeron varias muestras de agua que se analizaron con la ayuda de la técnica (LIBS), enfocando una radiación de aproximadamente 60 mJ proveniente de un láser de Nd:YAG de 532 nm de longitud de onda sobre la muestra. Los espectros del plasma láser sobre la muestra fueron registrados con un espectrógrafo Mechelle ME5000 de la empresa Andor Technology acoplado a una cámara ICCD y se realizó la toma de espectros dentro de la región comprendida entre 200-950 nm.

4. RESULTADOS

Los valores de corriente y voltaje obtenidos durante la prospección geoelectrica permitieron obtener un perfil de resistividades en dos dimensiones del terreno el cual mostró la posible presencia de agua en la zona debido a los bajos valores de resistividad arrojados en la misma Fig.4. Los diferentes valores de resistividad se pueden apreciar a través de la variedad de colores en la tomografía. A los bajos valores de resistividad el software asigna colores azules los cuales pueden ser asociados a presencia de agua subterránea en la zona.

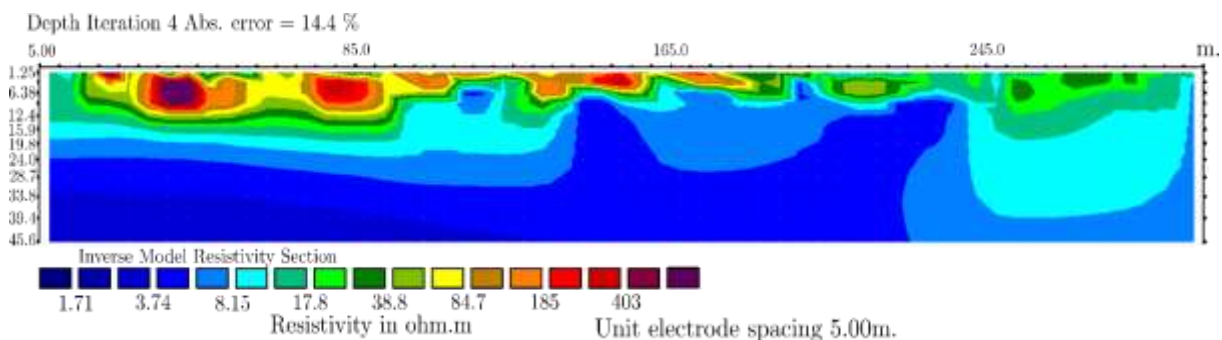
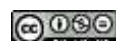


Fig.4. Tomografía de la zona de estudio obtenida a partir de la técnica de prospección eléctrica.

Una vez identificado la ubicación de los posibles acuíferos se procedió a realizar una perforación con la que se corroboró la presencia de agua en la zona a una profundidad aproximada de 13 m. Perforado el pozo se procedió a tomar las diferentes muestras de agua, una vez conseguidas las muestras de agua se obtuvieron los espectros atómicos de las muestras en un rango de longitudes de onda comprendido entre 200 a 900 nm. Para esto se enfocó la radiación del láser en la superficie de la muestra líquida y para obtener una mejor relación señal-ruido de los datos se realizó una toma acumulativa de 10 pulsos en intervalos de 0.5 s para cada espectro. Se midieron los valores de los picos de los espectros y se realizó una asignación espectral de las líneas encontradas con el fin de identificar los elementos presentes en la muestra y se compararon con los espectros tomados de fuentes espectrales conocidas como: plasma-láser en Aire [13], y la base de datos del NIST [14]. En esta etapa se pudo determinar la presencia de Hidrógeno, Oxígeno, Flúor, Nitrógeno, Sodio y Calcio en las muestras de agua analizadas. En la región comprendida entre los 200 y los 500 nm se observaron líneas procedentes de los elementos Sodio, Calcio e Hidrógeno Fig.5. Entre el intervalo de longitudes de onda de 500 a los 700 nm encontramos principalmente líneas de Flúor y otra línea de hidrógeno. Finalmente, entre el intervalo de longitudes de onda comprendido entre 700 y los 900 nm observamos líneas de Oxígeno y Nitrógeno. Cabe aclarar que todos estos espectros fueron tomados en una sola toma comprendida entre los 200 a los 900 nm, solo que por claridad se dividió en tres partes para que



se observaran con mayor claridad. La Tabla 1 resume las características espectrales de las líneas identificadas en las muestras de estudio

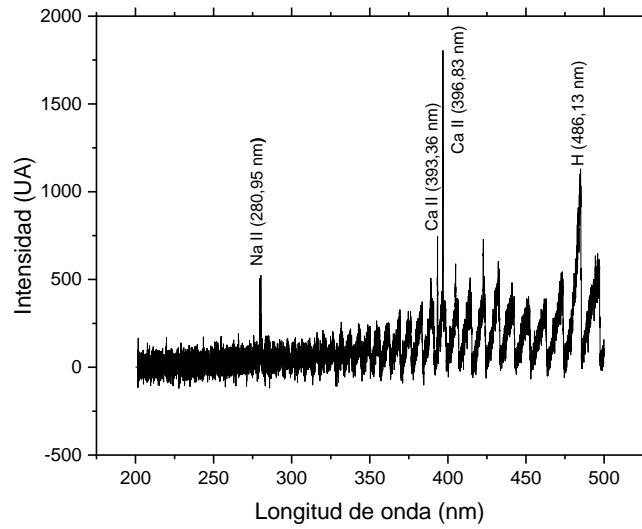


Fig.5. Espectro plasma-láser en muestra de agua subterránea, región entre 200 y 500 nm.

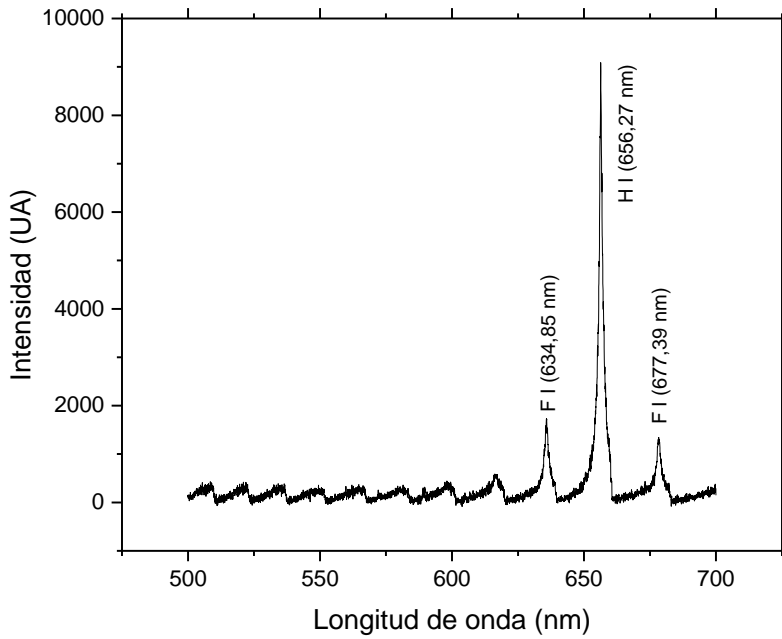


Fig.6. Espectro plasma-láser en muestra de agua subterránea, región entre 500 y 700 nm.

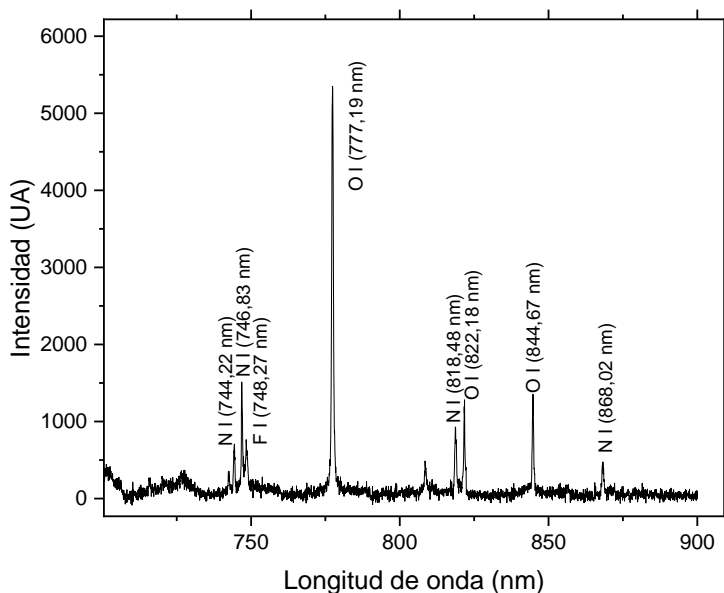


Fig 7. Espectro plasma-láser en muestra de agua subterránea, región entre 700 y 900 nm.

TABLA 1. Datos espectroscópicos de las líneas espectrales observadas en el rango de 200 nm a 960 nm de la muestra de agua.

Longitud de onda (nm)	Elemento	Configuración	E_i (cm^{-1})	E_k (cm^{-1})	$g_k A_{ki}$ (10^8 s^{-1})
283.95	Na II	$2s^2 2p^5 3s - 2s^2 2p^5 3p$	264 924.32	300 507.11	4.46
393.36	Ca II	$3p^6 4s - 3p^6 4p$	0.0	25 414.40	5.88
396.83	Ca II	$3p^6 4s - 3p^6 4p$	0.0	25 191.51	2.8
486.13	H I		82 259.158	102 823.904	2.69
634.85	F I	$2s^2 2p^4(^3P)3s - 2s^2 2p^4(^3P)3p$	102 680.44	118 427.82	9.28e-01
656.27	H I	$3d - 2p$	82 259.28500	97 492.3194	2.155
677.39	F I	$2s^2 2p^4(^3P)3s - 2s^2 2p^4(^3P)3p$	102 405.71	117 164.01	5.8e-01
744.22	N I	$2s^2 2p^2(^3P)3s - 2s^2 2p^2(^3P)3p$	83 317.830	96 750.840	4.76e-01
746.83	N I	$2s^2 2p^2(^3P)3s - 2s^2 2p^2(^3P)3p$	83 364.620	96 750.840	7.84e-01
748.27	F I	$2s^2 2p^4(^3P)3s - 2s^2 2p^4(^3P)3p$	102 680.44	116 040.88	2.60e-01
777.19	O I	$2s^2 2p^3(^4S^o)3s - 2s^2 2p^3(^4S^o)3p$	73 768.200	86 631.454	2.58
818.48	N I	$2s^2 2p^2(^3P)3s - 2s^2 2p^2(^3P)3p$	83 284.070	95 493.690	5.00e-01
822.18	O I	$2s^2 2p^3(^2D^o)3s - 2s^2 2p^3(^2D^o)3p$	101 135.407	113 294.816	2.02
844.67	O I	$2s^2 2p^3(^4S^o)3s - 2s^2 2p^3(^4S^o)3p$	76 794.978	88 631.146	1.61
868.02	N I	$2s^2 2p^2(^3P)3s - 2s^2 2p^2(^3P)3p$	83 364.620	94 881.820	2.02e+00



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo al análisis de resultados geoelectrónicos se puede afirmar que el método Geofísico arrojó un perfil tomográfico de 3 capas; Una capa superficial (entre 0 y 5 m) con los mayores valores de resistividad correspondiente a depósitos eólicos (aluvión), arcillas no saturadas; una segunda capa (entre 5 y 13 m) con valores intermedios de resistividad, correspondientes a un material lodo lítico de grano fino y arcillas húmedas; y una tercera capa (entre 13 m y >13 m) con mínimos valores de resistividad que corresponden a arenitas saturadas y arcillas saturadas ó el acuífero, objeto de estudio en la zona. A través de los resultados obtenidos de la caracterización por medio la técnica LIBS, se pudo observar que los elementos encontrados en la muestra, son elementos que por lo general están presentes en el agua subterránea debido al gran poder de disolución del agua y a la composición de las rocas. De igual manera al no encontrar indicios de metales pesados, por lo menos en niveles suficientes que sean detectados por la técnica LIBS, podemos concluir que los campesinos en la zona cuentan con un gran recurso hidrogeológico con buenas características, el cual si es explotado de manera adecuada podría suplir por mucho tiempo las necesidades hídricas para uso agrícola de la zona.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se utilizó la técnica LIBS y la técnica de Prospección Eléctrica Vertical PEV para el estudio de aguas subterráneas en el sendero “El Limón” del municipio de Palmar de Varela -Atlántico. La técnica PVE permitió la ubicación de los acuíferos de donde se extrajeron las muestras de agua, dichas muestras fueron posteriormente analizadas usando la técnica espectroscópica LIBS y se pudo establecer la presencia de los elementos N, O, F, Ca y Na. No se detectaron líneas espectrales de elementos contaminantes pesados en los espectros de agua estudiados. Una mejora en el montaje experimental podría ser el hacer fluir un gas inerte como Argón en la atmosfera del plasma con el fin de reducir las líneas espectrales provenientes del aire circundante y de esta forma mejorar el nivel de detección de la técnica.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Atlántico por su apoyo a través de la convocatoria “Primera convocatoria interna para fortalecimiento de semilleros de investigación”. Al XVII Encuentro Nacional de Óptica y VIII Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones por permitir socializar el resultado de este trabajo,

